

---

# 4

---

## LES CONVERTISSEURS AC/AC : LES GRADATEURS

---

### 1- Introduction

Les gradateurs sont des convertisseurs AC/AC. Ils font l'interface entre la source et une charge demandant une tension variable en valeur efficace. Ils sont utilisés dans l'alimentation des machines à courant alternatif et surtout dans les fours.

### 2- gradateur monophasé

#### 2-1. Constitution

Un gradateur est constitué de deux thyristors montés en antiparallèle ; commandés successivement à  $\Psi$  et  $\pi + \Psi$ . La figure (4-1) illustre le schéma de principe d'un gradateur monophasé.  $Th_1$  est commandé dans l'intervalle  $[0, \pi]$  alors que  $Th_2$  est commandé dans l'intervalle  $[\pi, 2\pi]$ . La tension d'alimentation est :

$$v(t) = V_m \sin(\omega t)$$

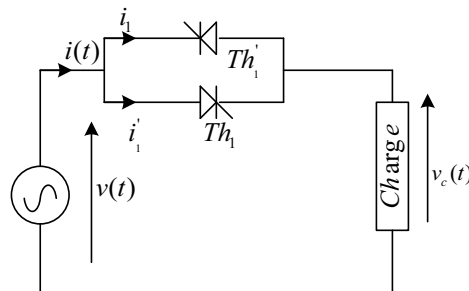


Figure (4-1) : Schéma du gradateur

## 2-2. Etude en charge

### 2-2-1. Charge purement résistive ( $R$ )

La chute de tension aux bornes d'un thyristor passant est supposée négligeable.

-  $\psi \leq \omega t \leq \pi$ , le thyristor  $Th_1$  est passant. La tension aux bornes de la charge et le courant dans la charge sont :

$$v_c(t) = V_m \sin(\omega t)$$

$$i(t) = \frac{V_m}{R} \sin(\omega t)$$

-  $\psi + \pi \leq \omega t \leq 2\pi$ , le thyristor  $Th_2$  est passant. La tension aux bornes de la charge et le courant dans la charge sont :

$$v_c(t) = V_m \sin(\omega t)$$

$$i(t) = \frac{V_m}{R} \sin(\omega t)$$

- pendant le reste de la période :

$$v_c(t) = 0$$

$$i(t) = 0$$

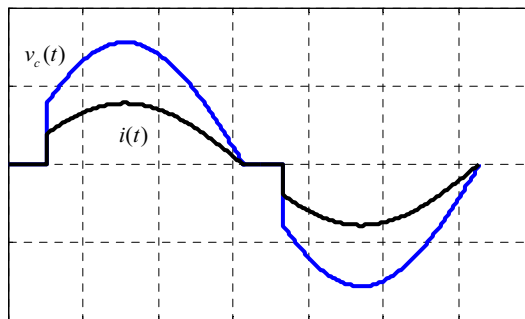


Figure (4-2) : Allure du courant et de la tension

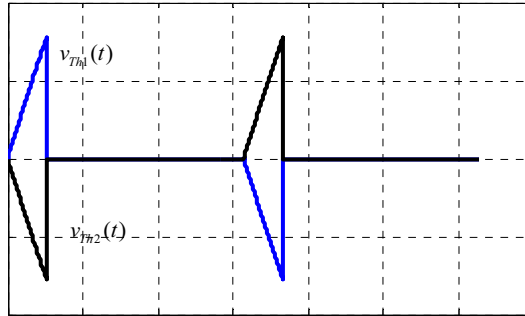


Figure (4-3) : Tension aux bornes d'un redresseur

Le courant efficace dans la charge s'exprime par :

$$I^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{V_m^2}{R^2} \sin^2(\omega t) d(\omega t) = \frac{V}{R} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin(2\psi)}{2\pi}}$$

En variant  $\psi$  de 0 à  $\pi$ , on fait varier le courant de son maximum à zéro

### 2-2-2. Charge résistive et inductive ( $R-L$ )

L'argument  $\varphi$  de la charge réduit la variation de  $\psi$ . On distingue alors deux cas :

Cas 1 : Fonctionnement à  $\psi \leq \varphi$

Lorsque l'angle d'amorçage des thyristors devient inférieur à  $\varphi$ , le fonctionnement dépend de la nature des signaux de commande appliqués aux gâchettes :

Supposons que l'impulsion est de courte durée. Si le thyristor  $Th_1$  est le premier à recevoir une impulsion utile, il entre en conduction. Le courant  $i$  est donnée par :

$$i = i_f + i_\ell = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) + A e^{-\frac{R}{L}(\omega t - \frac{\psi}{\omega})}$$

à  $\omega t_0 = \psi$ , le courant  $i$  est nul.

$$i = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) - \frac{V_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{\theta - \psi}{\tan(\varphi)}}$$

400

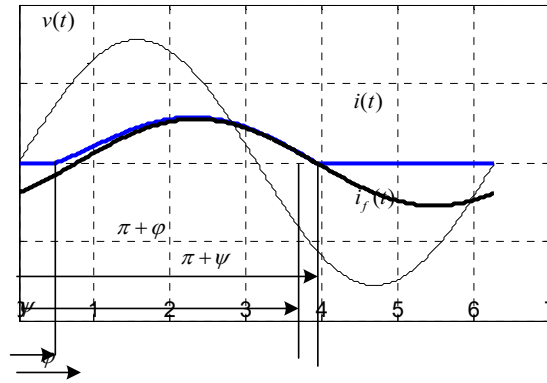


Figure (4-4) : Courant de charge

400

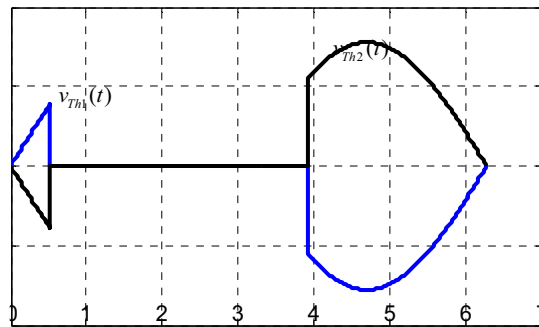


Figure (4-5) : Tension d'un redresseur

L'impulsion envoyée sur la gâchette du thyristor  $Th_2$  pour  $\omega t = \pi + \psi$  trouve ce composant avec une tension anodique nulle et même négative (chute de tension aux bornes de  $Th_1$  passant). Elle est donc sans effet. Quand la tension aux bornes de  $Th_2$  devient positive, il n'y a plus de courant gâchette. Le montage fonctionne alors en redresseur commandé simple alternance.

Cas 2 : Fonctionnement à  $\psi$  compris entre  $\varphi$  et  $\pi$

Le thyristor  $Th_1$  devient passant à partir de l'instant  $\omega t_0 = \psi$ . Le fonctionnement est régi par :

-----

$$Ri + L \frac{di}{dt} = V_m \sin(\omega t)$$

Le courant a pour expression :

$$i = i_f + i_t = \frac{V_m}{Z} \sin(\omega t - \varphi) - \frac{V_m}{Z} \sin(\psi - \varphi) e^{-\frac{\omega t - \psi}{\tan(\varphi)}}$$

Le thyristor s'annule à  $\omega t_1 = \pi + \varphi$  et il reste bloqué jusqu'à l'instant  $\omega t_2 = \pi + \psi$ . A cet instant le thyristor  $Th_2$  entre en conduction.

Pour  $\psi = \varphi$  le terme exponentiel de l'expression du courant  $i$  disparaît, le courant est sinusoïdal. En variant  $\psi$  de  $\varphi$  à  $\pi$ , on fait croître le courant efficace de 0 à  $\frac{V}{Z}$ . La figure suivante illustre l'allure du courant.

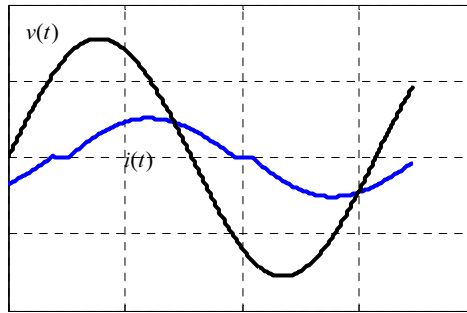


Figure (4-6) : Courant de charge

### 2-2-3. Caractéristiques

Le développement en série de Fourier de la tension aux bornes de la charge  $v_c$  comprend, outre le fondamental de pulsation  $\omega$  et de valeur efficace  $V_{cl}$ , tous les harmoniques impairs de pulsation  $(2k+1)\omega$ .

$$V_{c_{2k+1}} = \sqrt{A_{2k+1}^2 + B_{2k+1}^2}$$

$$A_{2k+1} = \frac{V}{\pi} \left[ \frac{\sin(2k\omega t) - \sin(2k\psi)}{2k} - \frac{\sin 2(k+1)\omega t - \sin 2(k+1)\psi}{2k+1} \right]$$

$$B_{2k+1} = \frac{V}{\pi} \left[ \frac{\cos 2(k+1)\psi - \cos(2k+1)\omega t}{2k+1} - \frac{\cos 2k\psi - \cos(2k\omega t)}{2k} \right]$$

Pour le fondamental :

$$A_1 = \frac{V}{\pi} \left[ \theta_1 - \psi - \frac{\sin(2\omega t) - \sin(2\psi)}{2} \right]$$

$$B_1 = \frac{V}{2\pi} [\cos 2\psi - \cos 2\omega t]$$

Les harmoniques du courant se déduisent de celle de la tension à partir de la relation suivante :

$$i_{2k+1} = \frac{V_{C_{2k+1}}}{Z_{2k+1}}$$

### 3- gradateur triphasé

Le gradateur triphasé normal est formé de trois groupes de thyristors ( $Th_1, Th'_1$ ), ( $Th_2, Th'_2$ ) et ( $Th_3, Th'_3$ ) montés entre les trois bornes de la source et celles du récepteur.

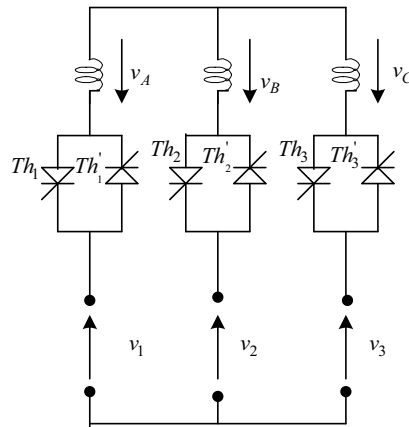


Figure (4-7) : Gradateur thriphasé

$$\begin{cases} v_A(t) = V_m \sin(\omega t) \\ v_B(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ v_C(t) = V_m \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases}$$

Pour tracer les formes d'ondes et tracer les caractéristiques, il suffit d'étudier un sixième de la période. En effet, les courants dans les trois phases sont identiques à  $\frac{2\pi}{3}$  près. De plus, l'alternance de chaque courant reproduit, au signe près, son alternance positive.

$$\begin{aligned} i_A(\omega t + \frac{2\pi}{3}) &= i_C(\omega t) & i_A(\omega t - \frac{2\pi}{3}) &= i_B(\omega t) \\ i_A(\omega t \pm \pi) &= -i_A(\omega t) & i_A(\omega t \pm \pi + \frac{2\pi}{3}) &= -i_C(\omega t) \\ i_A(\omega t \pm \pi - \frac{2\pi}{3}) &= -i_B(\omega t) \end{aligned}$$

Le récepteur est formé des trois résistances identiques. Lorsque l'angle de retard à l'amorçage varie de 0 à  $\frac{5\pi}{6}$ , trois modes de fonctionnement se succèdent.

Pour simplifier le tracé des tensions aux bornes de la charge, on s'est limité au tracé de  $v_1$  seulement.

### 3-1. Premier mode

Ce mode est défini pour :  $0 \leq \psi \leq \frac{\pi}{3}$

- Pour  $\psi < \omega t < \frac{\pi}{3}$ ,  $Th_1$ ,  $Th_2'$  et  $Th_3$  conduisent.

$$\begin{aligned} v_1 &= Ri_A = v_A & v_2 &= Ri_B = v_B & v_3 &= Ri_C = v_C \\ v_{Th1} &= v_{Th2} = v_{Th3} & &= 0 \end{aligned}$$

- Pour  $\frac{\pi}{3} < \omega t < \frac{\pi}{3} + \psi$ ,  $Th_1$  et  $Th_2'$  conduisent.

$$\begin{aligned} v_1 &= -v_2 = \frac{1}{2}(v_A - v_B) & v_3 &= 0 & i_A &= -i_B = \frac{v_A}{R} \\ v_{Th1} &= v_{Th2} = 0 & v_{Th3} &= \frac{3}{2}v_C \end{aligned}$$

### 3-2. Deuxième mode

Ce mode est caractérisé par la conduction de deux redresseurs. Il est défini pour

$\frac{\pi}{3} \leq \psi \leq \frac{\pi}{2}$ . Quand  $\psi$  varie de  $\frac{\pi}{3}$  à  $\frac{\pi}{2}$ , l'intervalle de débit des redresseurs reste constant et égal au tiers de période mais il se décale progressivement.

$$\begin{aligned} v_1 = -v_2 = \frac{1}{2}(v_A - v_B) \quad v_3 = 0 \quad i_A = -i_B = \frac{v_A}{R} \\ v_{Th1} = v_{Th2} = 0 \quad v_{Th3} = \frac{3}{2}v_C \end{aligned}$$

Ce fonctionnement cesse pour  $\psi = \frac{\pi}{2}$ .

### 3-2. Troisième mode

Il est défini pour  $\frac{\pi}{2} \leq \psi \leq \frac{5\pi}{6}$  et caractérisé par la conduction de deux ou zéro redresseurs.

L'existence d'intervalles de conduction après des intervalles où tous les courants s'annulent nécessite un procédé supplémentaire. Pour cela il faut :

- Soit commander les redresseurs par des signaux d'une largeur supérieure à  $\frac{\pi}{3}$ ,
- Soit appliquer des impulsions de confirmation. Quand on envoie le signal de blocage à un redresseur pour faire débiter sa conduction, il faut alors envoyer une impulsion sur la gâchette du thyristor qui vient de s'éteindre.

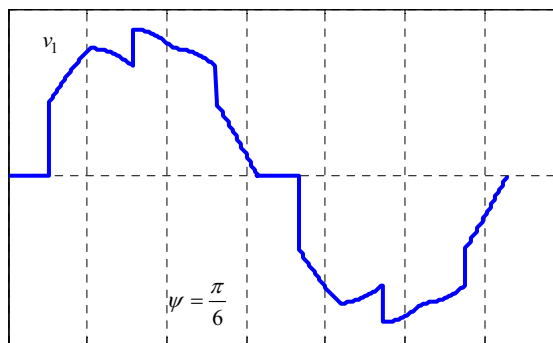


Figure (4-8) : Tension de charge



#### 4- Travaux dirigés

On se propose d'étudier en partie un système constitué d'un gradateur triphasé. Dans toute cette partie, les interrupteurs sont constitués de thyristors supposés idéaux (circuit ouvert à l'état passant et court circuit à l'état passant). Le réseau a pour pulsation  $\omega$ .

##### I- Gradateur monophasé

On donne fig.1 le schéma d'un gradateur monophasé débitant sur une charge purement résistive. Les thyristors sont amorcés avec un retard angulaire

$\alpha_0 = \omega t_0 = \frac{\pi}{2}$  par rapport aux passages par zéro de la tension  $v(t)$ . On donne

$V = 220V$  et  $R = 10\Omega$

- 1- Donner, en les justifiant, les intervalles de conduction des deux thyristors et le chronogramme de l'intensité  $i(t)$  du courant dans la résistance  $R$ .
- 2- Pour la valeur particulière  $\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$ , exprimer simplement la puissance active moyenne  $P$  fournie par le réseau en fonction de  $V$  et  $R$ . Application numérique.
- 3- En déduire les valeurs efficaces  $I_{eff}$  de  $i(t)$  et  $U_{ceff}$  de  $U_c(t)$ .
- 4- Dans le développement en série de Fourier de  $i(t)$ , on trouve que le fondamental a pour expression :  $i_1(t) = \text{Im } ax \sin(\omega t - \varphi_1)$  avec  $\text{Im } ax = 18.4A$  et  $\varphi_1 = 32.5^\circ = 0.567\text{rad}$ . Déduire de la connaissance de  $i_1(t)$ , une expression de la puissance  $P$ .
- 5- Que vaut la puissance réactive fournie par le réseau ?
- 6- Quelle est la puissance apparente  $S$  de la source ?
- 7- Calculer le facteur de puissance de l'installation.
- 8- Proposer une méthode (schéma, type d'appareil à utiliser) pour mesurer la valeur efficace du courant, la puissance active et la puissance réactive. On dispose d'appareils analogiques (alt. Et continu) et numériques TRMS avec position AC et DC. Le wattmètre est de type électrodynamique.

##### II- Gradateur triphasé

On en donne fig.2 le schéma de principe. Les tensions sinusoïdales  $v_a$ ,  $v_b$  et  $v_c$  ont même valeur efficace  $V$  et constituent un système triphasé équilibré direct. Sur le document réponse, on précise le séquençement de l'amorçage des 6 thyristors dans le cas où  $\alpha_0 = 30^\circ$ . On a toujours  $V = 220V$  et la charge est résistive. Les interrupteurs sont supposés idéaux.

Le fonctionnement étant parfaitement symétrique, on étudie en premier temps l'intervalle  $[0^\circ, 180^\circ]$

- 1- Sur chacun des intervalles suivants :  
 $[0^\circ, 30^\circ]$ ,  $[30^\circ, 60^\circ]$ ,  $[60^\circ, 90^\circ]$ ,  $[90^\circ, 120^\circ]$ ,  $[120^\circ, 150^\circ]$  et  
 $[150^\circ, 180^\circ]$ , donner un schéma équivalent de l'installation tenant  
 compte des interrupteurs passants et expliquer la forme de la tension  
 $U_{ca}$  donnée sur le document réponse entre  $[0^\circ, 180^\circ]$ .
- 2- Compléter le chronogramme de  $U_{ca}$  sur l'intervalle  $[180^\circ, 360^\circ]$ .

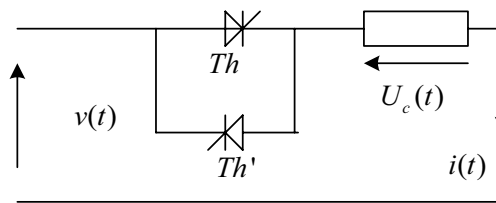


Fig.1 : Gradateur monophasé

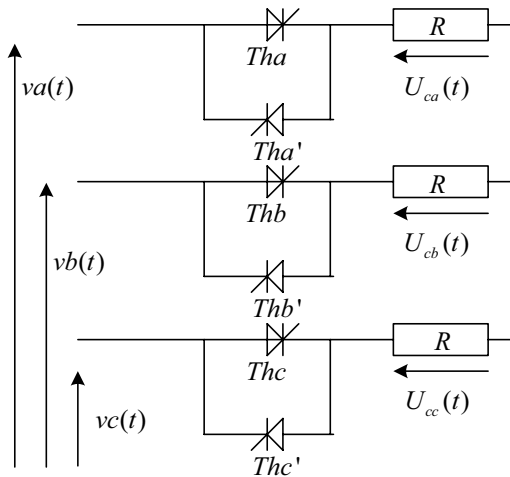


Fig.2 : Gradateur triphasé